

소규모 저수지에서 밀도류 순환의 수치해석

Numerical Analysis of Circulation Due to Density Current in a Small Reservoir

윤태훈* · 한운우**

Yoon, Tae Hoon · Han, Woon Woo

Abstract

The circulation due to bottom density current produced by a dense inflow into a small reservoir is analysed by numerical scheme. Before the front of the density current arrives at the downstream end, the mixing in the reservoir is mainly caused by the anticlockwise vortex formed at the downstream of plunging point along the movement of bottom density current. Upon the arrival of the front of the density current at the downstream end an internal surge is created through an internal hydraulic jump. With repeated propagation of the internal surge back and forth the mixing in the reservoir is progressed and the thickness of dense layer is increased upward. The dilution of the overflow at downstream end is found to depend on inflow densimetric Froude number, reservoir length and elapsed time. The time required for the overflow to attain a specified dilution increases as reservoir length increases and Fre decreases.

요 지

밀도가 큰 유체의 유입으로 인한 소규모저수지의 바닥밀도류에 의한 순환이 수치해에 의하여 해석된다. 밀도류전면이 하류경계에 도달하기전에는 밀도류전면의 이동에 따라 침강점 하류에 형성된 반시계방향 와의 이동에 의하여 저수지내 순환과 혼합이 이루어지며, 밀도류전면이 하류경계에 도달한 후에는 하류경계에서 밀도류의 상승으로 인한 일종의 내부파가 형성되고 이 파의 상 하류 반복 전파됨에 따라 저수지내 혼합이 이루어지면서 밀도층의 두께는 증가한다. 하류경계에서 유출되는 유체의 희석은 유입밀도후르드수 Fre, 저수지길이, 시간의 함수이며 유출유체의 밀도가 일정값에 도달되는 시간은 저수지길이와 길수록, Fre가 작을수록 증가하는 것으로 나타났다.

1. 서 론

운수지, 침전지 등과 같이 비교적 단면이 일정한 소규모저수지로 밀도가 다른 유체가 유입하면 유입

유체와 수용수역유체의 밀도차이로 인하여 저수지 내에는 밀도류가 형성되고 저수지 규모에 따라 국부적으로 또는 전수역에 걸쳐 혼합과 순환이 일어나게 된다. 이러한 혼합과 순환은 저수지의 온도 및 수질의 변화를 유발하므로 수자원시스템의 효율적인 관리가 요구되며 운수지 하류경계에서 적정수온의

* 정희권 · 한양대학교 토목공학과 교수

** 정희원 · 대전대학교 환경공학과 조교수

물이 방류되지 않을 경우에는 농작물의 냉해와 주변 수생태계에 악영향을 미친다. 따라서 이에 대한 효율적인 관리와 주변에 미치는 악영향을 최소화하기 위해서는 밀도류의 거동 및 순환 등 저수지내 흐름변화에 대한 지식이 필요하다.

대댐의 방류구조는 일반적으로 선택인출구조를 취하여 적정온도의 물을 방류하는 것이 가능하나 선택인출구조를 채택하지 않은 댐에서는 하류에서 요구되는 적정온도의 물을 방류하는 것이 불가능하므로 이러한 경우에는 댐 직하류에 온수지(또는 조정지)를 건설하여 댐 하류에서 방류된 온도가 낮은 물의 온도 상승을 도모한다. 특히 온수지는 차가운 물의 온도상승을 도모하여 하류경계에서 적정수온의 물을 방류하는 것이 주목적으로써 유입유체의 온도(또는 밀도)가 하류경계에서 방류되는 유체의 온도에 미치는 영향을 파악하여야 한다. 따라서 밀도가 큰 유체의 유입이 지속될 경우 밀도류전면이 하류경계에 도달한 후의 저수지내 순환현상에 대한 지식이 필요하다.

밀도류의 거동과 순환에 대한 연구는 그동안 많은 연구가 진척되어 밀도류전면의 거동^(2,3,4,6), 침강현상⁽¹⁾, 밀도층두께⁽²⁴⁾ 등 개개 특성에 관한 연구가 진행되어 왔으나 이를 일괄적으로 다룬 연구⁽¹⁴⁾는 극히 드물고 특히 밀도류에 의한 순환현상^(5,12)과 밀도류전면이 하류경계에 도달한 후 하류경계에서 발생하는 내부파의 이동에 관한 연구^(7,14)는 극히 드문 실정이다. 따라서 본 연구는 소규모저수지에서 밀도류의 발생과 이동에 따른 전반적인 흐름특성과 저수지내 순환 및 혼합현상 등에 대한 수리학적 특성을 규명하고 하류경계에서 월류되는 유체의 밀도(유입 유체의 희석)를 예측한다.

본 연구는 수용수역의 밀도가 거의 일정하고 비교적 단면이 일정한 온수지와 같은 직사각형 저수지에서 유입 및 방류량과 유입유체의 밀도차이에 중점을 두어 유입구의 폭이 저수지의 폭에 해당하는 X-Z 2차원흐름에 한하여 지배방정식에 유함수, 와도를 이용하여 근사해를 구하며 하류경계는 상부에서 웨어형태로 월류되고 흐름은 등류로 가정하여 해석한다.

2. 지배방정식과 경계조건

수용수역유체보다 밀도가 큰 유체가 그림 1과 같은 수역에 연속 유입되는 현상을 고려하며 다음과 같은 가정하에 수행된다.

- (1) 유입흐름은 2차원, 비압축성이다.
- (2) 유입구에서 유체는 수평방향으로만 유입한다.
- (3) 하류경계의 상부에서 유출되는 유체는 등류로 가정한다.
- (4) 작은 밀도차이에 Boussinesq가정이 적용된다.
- (5) 자유수면은 연직변화가 없으며 수면에서 유량공급과 대기의 영향은 없다.
- (6) 수평 및 연직방향의 추적물확산계수는 같다.

수치계산에 있어서 주된 어려움의 하나는 적절한 매개변수(와점성계수, 추적물확산계수)의 선정이다. 저수지내의 매개변수의 변화는 그리 크지 않으며 전체적인 저수지내의 매개변수값은 설계의 측면에 있어서는 평균값으로 대변될 수 있으므로 와점성계수와 추적물확산계수를 상수로 한 단순한 접근방법도 좋은 결과를 나타낸 바 있으므로 본 연구에서는 이들 계수를 상수로 취급한 해석이 시도된다⁽⁸⁾.

2.1 지배방정식

상기 가정하의 2차원흐름에서 연속방정식, 운동량 방정식 및 추적물보존식에 유함수 ψ 와 와도 ω 를 도입하고 교차미분을 통하여 압력항을 소거하면 계산의 어려움이 제거될 뿐만 아니라 방정식의 수를 줄임으로써 계산시간의 단축을 기할 수 있으므로 유함수와 와도를 이용한 해석이 많이 이용되고 흐름현상을 쉽게 해석하기 위하여 무차원수를 도입하면 다음과 같은 무차원지배방정식을 얻는다.^(6,15)

무차원유함수-와도식

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = \Omega \quad (1)$$

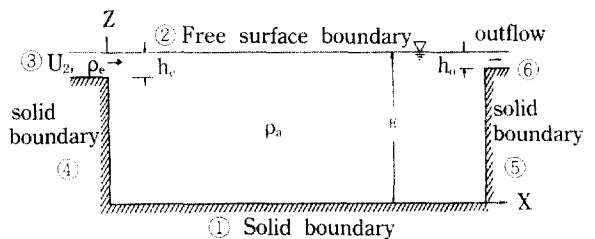


그림 1. 밀도류의 영역 및 경계

와도보존식

$$\frac{\partial \Omega}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X}(U\Omega) + \frac{\partial}{\partial Z}(W\Omega) = \frac{1}{F_2} \frac{\partial \Gamma}{\partial X} + \frac{1}{Re_x} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{1}{Re_z} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} \quad (2)$$

추적물보존식

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X}(U\Gamma) + \frac{\partial}{\partial Z}(W\Gamma) = \frac{1}{Sc_x Re_x} \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial X^2} + \frac{1}{Sc_z Re_z} \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial Z^2} \quad (3)$$

무차원속도

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Z}, \quad W = -\frac{\partial \Psi}{\partial X} \quad (4)$$

무차원수

$$X = x/H, \quad Z = z/H, \quad U = u/U_o, \quad W = w/U_o$$

$$\Psi = \phi/(U_o H), \quad \Omega = \omega H/U_o, \quad \Gamma = \Delta \rho/\rho_a, \quad T = t U_o/H$$

여기서 H는 정지수역의 수심, U_o 는 $U_o = q_e/H$ 로 정의한 특성속도, Γ 는 무차원밀도차이, $\Delta \rho$ 는 $\rho - \rho_a$, ρ_e 는 유입유체의 밀도, ρ_a 는 주변유체의 밀도이다. 무차원매개변수는 레이놀즈수 $Re_x = U_o H/\epsilon_x$, $Re_z = U_o H/\epsilon_z$, 후르드수 $F = U_o/(gH)^{1/2}$, 슈밀수 $Sc_x = \epsilon_x/k$, $Sc_z = \epsilon_z/k$ 이며 k는 추적물확산계수, g는 중력가속도, t는 시간, ϵ_x , ϵ_z 는 와점성계수이다.

2.2 경계조건

그림 1과 같은 6가지의 경계에 대한 경계조건은 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

① 고체면 바닥

$$\Psi = \text{const.}, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} = 0, \quad \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2}, \quad U = 0, \quad W = 0$$

② 자유수면

$$\Psi = \text{const.}, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} = 0, \quad \Omega = 0, \quad U = \frac{\partial \Psi}{\partial Z}, \quad W = 0$$

③ 유입구

$$\Psi = \Psi_i(Z), \quad \Gamma = \Gamma_e, \quad \Omega = 0, \quad U = U_e, \quad W = 0$$

④ 상류벽면

$$\Psi = \text{const.}, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial X} = 0, \quad \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2}, \quad U = 0, \quad W = 0$$

⑤ 하류벽면

$$\Psi = \text{const.}, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial X} = 0, \quad \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2}, \quad U = 0, \quad W = 0$$

⑥ 유출구

$$\Psi = \Psi_L(Z), \quad \Gamma = \Gamma_{(Z=H-h_o)}, \quad \Omega = 0, \quad U = \frac{q_e}{h_o}, \quad W = 0$$

여기서 h_o 는 하류경계의 유출구수심이다. 상류벽면, 하류벽면 및 바닥에서 유함수 Ψ 와 X방향과 Z방향의 속도성분 U, W의 경계조건은 no flux, 무활조건, 유입구와 하류경계 유출구에서 유함수는 선형적으로 변화하며 자유수면에서는 일정하다. 밀도차이 Γ 의 경계조건은 정지수역 상류벽면, 하류벽면, 바닥 및 자유수면에서 단열성이라 가정하며 유입구에서 Γ 는 Γ_e , 하류경계 유출구에서는 $z=H-h_o$ 지점과 같다고 가정한다. 와도 Ω 의 경계조건은 유함수를 Taylor급수로 전개하여 유함수의 항으로 나타내며 자유수면, 유입구와 유출구에서는 0으로 가정할 수 있다. 유입구와 유출구에서 흐름은 등류라 가정하므로 X방향의 속도성분만 존재하고 자유수면에서 Z방향 속도는 0이다.

3. 수치해 과정

유입유체의 흐름은 유입구 근처에서는 급격히 변화하며 유입구에서 멀어질수록 점진적으로 변한다. 따라서 유입구 근처에서의 뚜렷한 흐름특성을 파악하기 위하여 다음과 같이 신장좌표 \bar{X} 를 도입하여 X방향좌표를 변환한다.⁽⁶⁾

$$\bar{X} = 1 - e^{-aX} \quad (5)$$

여기서 a는 주어진 흐름특성 및 경계에 따라 다르게 주어지는 상수이다. 식 (5)로 주어진 변환을 식 (1)~식 (4)에 대입하여 정리한 후 공간에는 중앙차분, 시간에는 전방차분, 비선형항에는 three point noncentral difference⁽¹³⁾을 사용하여 차분식으로 전개하여 유함수-와도-밀도차로부터 밀도류에 관한 수치해를 얻으며 유함수의 계산은 successive over relaxation 방법을 이용하여 Gauss-Seidel 반

복법에 의하여 수행되며 음해법으로 전개된 와도보존식과 추적물보존식은 Gauss-Seidel 반복법으로 해를 얻는다.⁽¹⁵⁾ 유함수, 와도 및 밀도차이의 수렴조건은 다음과 같다.

$$\text{Max} \left| \frac{C_{ij}^{k+1} - C_{ij}^k}{C_{ij}^k} \right| < E \quad (6)$$

여기서 $E=1.0 \times 10^{-5}$, k =반복회수, C =각 격자점에서의 변수이다.

4. 결 과

밀도류흐름을 지배하는 주된 무차원수는 유입밀도후르드수(inflow densimetric Froude number), Fr_e 로서 $Fr_e = U_e(g'he)^{1/2}$ 로 정의되며^(6,14) 여기서 g' 은 $g(\rho_e - \rho_a)/\rho_a$ 이다. 본 연구에서 유입밀도후르드수 Fr_e 의 범위가 0.8~6.7, 레이놀즈수 Re 의 범위는 250~2500 이며 X, Z 방향 격자수는 60×50 , $\Delta T=0.1$, Sc 는 1000, 식(5)의 상수 a 는 0.1~0.4를 사용하였다.

$Fr_e > 1.5$ 의 경우에는 상기한 격자수와 시간간격을 사용하여 획득된 결과는 수리실험결과⁽¹⁴⁾와 비교해서 일치된 결과를 나타내었으나 $Fr_e < 1.5$ 의 경우에는 밀도가 큰 유체가 유입하여 침강하면서 바로 주변 유체와 혼합되어 완전히 희석된 결과를 나타내었는데 이는 실제 현상 및 수리실험결과와 상이하였으므로 $Fr_e < 1.5$ 에 대한 해석에는 적절한 X 방향 격자수에 대한 선택이 요구되었다. Pao 등⁽⁹⁾은 X 방향의 격자수가 밀도후르드수 Γ 에 영향을 받음을 밝힌 바 있으며 $\Gamma \geq 0.2$ 때보다 $\Gamma < 0.2$ 에서 X 방향의 격자수를 2배 정도 크게 사용하므로서 좋은 결과를 보인바 있다. Fr_e 에 관계없이 X 방향의 격자수를 크게하여 안정된 결과를 획득함은 많은 컴퓨터 연산시간이 소요되어 비경제적이므로 본 연구에서는 컴퓨터 연산시간을 가능한 한 적게하기 위하여 $Fr_e < 1.5$ 에서는 X 방향의 격자수를 2배 정도의 크기를 사용함으로써 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

4.1 밀도류전면이 하류경계에 도달하기 전

4.1.1 바닥밀도류 형성과 진행

그림 2a,b는 밀도류전면이 하류경계에 도달하기

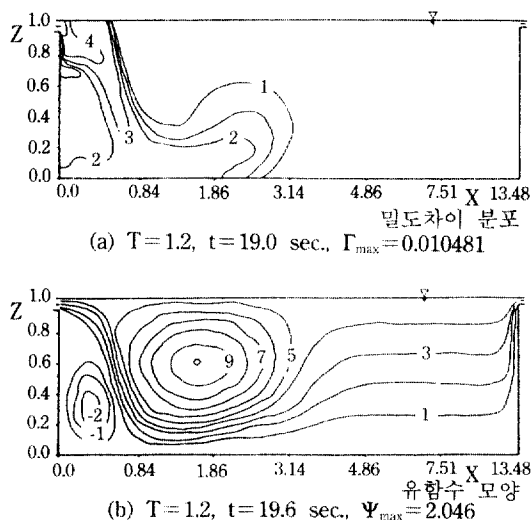


그림 2. 밀도류전면이 하류경계에 도달전의 저수지내 유함수 Ψ 및 무차원밀도차이 Γ 분포
 $\Gamma = (\rho - \rho_a)/\rho_a (Fr_e = 4.75, Re = 1502.6)$

전의 저수지내의 유함수 및 밀도차이 분포이다. 그림에서 밀도류의 경계는 무차원밀도차이 Γ_c 의 10%가 되는 곳을 기준하였으며 숫자는 Γ_c 에 대한 비율, T 는 무차원시간 tq_e/H^2 , t 는 시간이다.

유입초기에 유입유체는 음부력보다 운동량의 영향이 더 크기 때문에 자유수면과 평행한 방향으로 이동하며 하류방향으로 갈수록 유입운동량은 감소하고 음부력의 영향이 더 커지게 되어 유입유체는 가라앉기 시작하고 유체의 침강에 따라 침강점 하류측에는 반시계방향의 와(+)로 표시가 형성되고 상류측에는 시계방향의 와(-)로 표시가 형성된다.

흐름이 더욱 진행되면 침강점 상, 하류에 형성된 와는 점차 그 세력이 확대되면서 유입유체는 바닥면에 도달하며 바닥까지 침강된 유체는 바닥밀도류를 형성한다. 이 때 밀도류전면이 하류로 이동함에 따라 와의 중심도 이동하면서 혼합이 이루어진다.

시간의 경과에 따라 흐름이 계속 진행되면 상류 벽면부근의 (-)와는 점차 사라지고 하류측의 (+)와는 더욱 세력이 확대되면서 바닥밀도류는 하류로 이동한다. 이 때 상류측에 형성된 (-)와의 소멸은 그 지점에서 유입유체와 주변유체와의 완전한 혼합을 나타낸다.

바닥밀도류가 형성되기 이전은 (+)와의 중심이

연직하향 및 흐름방향으로 이동하다가 바닥밀도류가 형성된 후에는 밀도류전면이 하류로 이동함에 따라 (+)와의 중심은 연직방향의 변화없이 하류방향으로 이동하는 것으로 미루어 보아 바닥밀도류가 형성되기 전에는 (+)와의 중심은 유입유체가 침강하는 방향에 따라 이동하고 바닥밀도류가 형성되면 일정한 하류방향으로 이동하면서 밀도류전면 뒤에 강한 혼합이 이루어지는 것으로 해석된다.

Fre가 작으면 Fre가 클 때보다 유입유체는 유입유체의 운동량에 의한 동력이 작아서 수평방향으로의 이동은 적고 상대적으로 음부력의 영향이 커서 유입구부근에서 바로 가라앉으므로 상류벽면부근의 (-)와는 나타나지 않거나 Fre가 클 때보다 약한 (-)와가 발생하며 침강점 하류측의 (+)와는 Fre가 클 때보다 더욱 강한 것으로 나타났다.

따라서 상류벽면 부근에서 (-)와의 형성은 유입유체의 Fre의 크기에 따라 결정되고, (-)와는 유입유체가 바닥에 도달할 때 까지는 그 세력이 증가하여 그 곳에서의 혼합은 점점 강해진다 유입유체가 바닥밀도류를 형성한 후 혼합이 완전히 이루어지면 (-)와는 점차 소멸된다.

그림 3~5는 각각 $Fre=4.75$, $T=1.2$ 때 연직방향 여러 지점에 대한 수평방향속도 변화, 연직방향속도 변화, 속도장으로써 유입구 근처에서는 침강점 좌, 우에 형성된 와로 인하여 유속변화가 크다. 그림 3, 4에서 $X=4.5$ 지점에서 부터는 수평 및 연직속도가 일정한 것은 밀도류의 영향이 아직 이 지점까지는 미치지 않음을 나타낸다. $Z=1.0$ (수면)에서 수평방

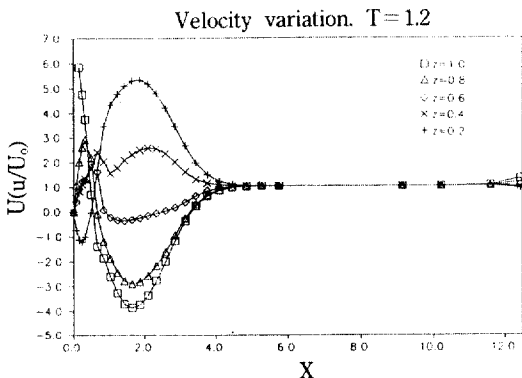


그림 3. $Fre=4.75$, $T=1.2$, $t=19$ sec.일 때 흐름방향에 따른 연직방향 여러 지점에서 무차원수평방향속도 $U(U=u/U_0)$ 의 변화

향유속은 유입구에서 하류방향으로 갈수록 점차 감소하는데 이는 유입운동량이 하류로 갈수록 점차 감소하기 때문이며 수평방향유속이 (+)에서 (-)로 변하는 지점이 침강점이다.

그림 6은 $Fre=4.75$ 때 흐름방향 여러 지점에서의 무차원밀도차이 Γ 를 나타낸 것으로 시간의 경과와 하류로 진행함에 따른 연직밀도분포를 나타낸다. 그림 6(a)는 유입유체가 침강하는 상태, 그림 6(b)는 바닥밀도류를 형성한 후 진행되는 과정이며 ▲는 수리실험결과이다.

4.1.2 침강점위치

그림 2~6에 나타난 바와 같이 밀도가 큰 유체가 유입하면 Fre의 크기에 따라 침강점 상, 하류에는 와가 형성된다. Fre가 큰 경우는 유입운동량이 크기때문에 침강점의 상류측에 형성된 (-)와가 침강점의 하류이동을 야기시키며 침강점 하류측의 (+)와는 주흐름방향과 방향이 반대이므로 침강점의 하류이동을 억제하나 (-)와에 비하여 세력이 미미하

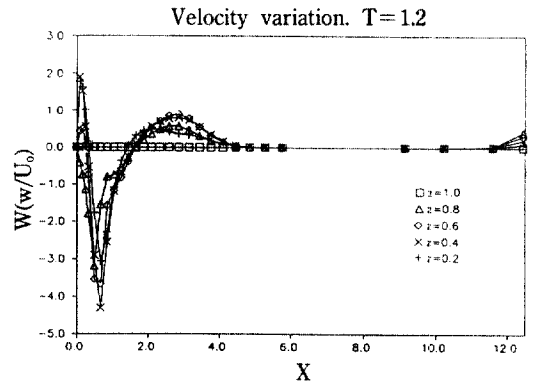


그림 4. $Fre=4.75$, $T=1.2$, $t=19$ sec.일 때 흐름방향에 따른 연직방향 여러 지점에서 무차원연직방향속도 $W(W=w/U_0)$ 의 변화

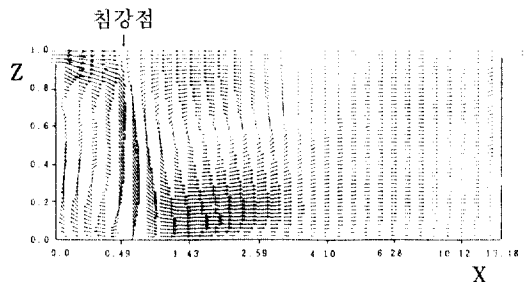


그림 5. $Fre=4.75$, $T=1.2$, $t=19$ sec.일 때 저수지내 속도장

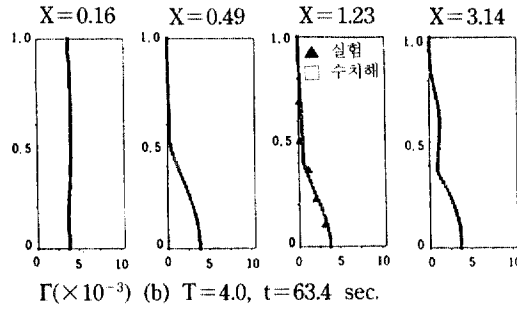
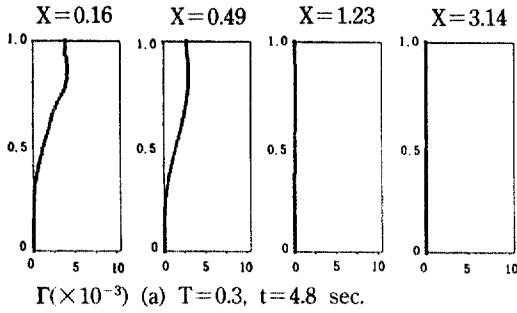


그림 6. $Fr_c = 4.75$ 일 때 시간의 경과에 따른 저수지내 흐름방향 여러 지점에서의 무차원밀도차이 Γ , $\Gamma = (\rho - \rho_a) / \rho_a$

므로 침강점의 하류이동이 증가한다. 시간이 경과하면 우측 (+)와의 세력이 점차 커져 침강점의 하류이동이 짧아지며 좌측의 (-)와가 소멸되면서 유입구로부터 일정한 거리에 이르러 안정침강점을 형성한다.

Fr_c 가 작으면 Fr_c 가 클 때보다 유입운동량이 작아서 침강점의 하류 이동을 야기시키는 (-)와가 형성되지 않거나 세력이 미미하므로 유입흐름은 침강점 하류측에 형성된 (+)와의 영향만을 받는다. 따라서 Fr_c 가 클 때보다 침강점의 하류이동이 억제되므로 침강점까지의 거리는 짧게 된다.

그림 7은 Fr_c 와 무차원침강점의 관계를 나타낸 것으로 다음식으로 나타낼 수 있으며 본 연구와 수리실험결과⁽¹⁴⁾는 비교적 일치된 결과를 나타내나 계수의 차이는 수리실험의 침강해석에는 3차원흐름이 적용되었기 때문인 것으로 해석된다.

$$X_p/b_c = 0.15 Fr_c^2 \quad (7)$$

여기서 X_p 는 유입구에서 침강점까지의 흐름방향 거리, b_c 는 유입구 폭이다.

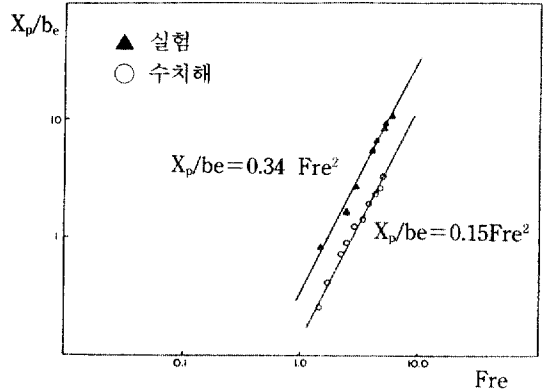


그림 7. Fr_c 에 따른 무차원침강점 X_p/b_c .

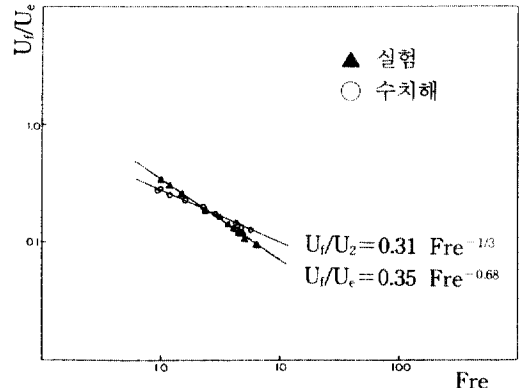


그림 8. Fr_c 에 따른 무차원밀도류전면속도 U_i/U_c .

4.1.3 밀도류전면속도, 두께 및 밀도층내 회석 무차원전면속도 U_i/U_c 와 Fr_c 의 관계를 나타낸 것이 그림 8로서 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$U_i/U_c = 0.31 Fr_c^{-1.3} \quad (8)$$

본 연구결과는 수리실험⁽¹⁴⁾ 결과와 약간의 차이는 있으나 U_i/U_c 는 Fr_c 의 함수이며 Fr_c 에 반비례함을 일치된 결과를 나타내었다.

그림 9는 바닥밀도류가 형성된 후 밀도류전면이 하류경계에 도달하기 전의 무차원밀도층두께와 Fr_c 의 관계를 나타낸 것으로 다음과 같은 지수식으로 나타낼 수 있다.

$$h/he = 3.0 Fr_c^{1.2} \quad (9)$$

-그림 10은 밀도류전면이 하류경계에 도달하기 전 머리(head)뒤의 밀도층내 회석 $S^{(14)}$ 와 Fr_c 와의 관

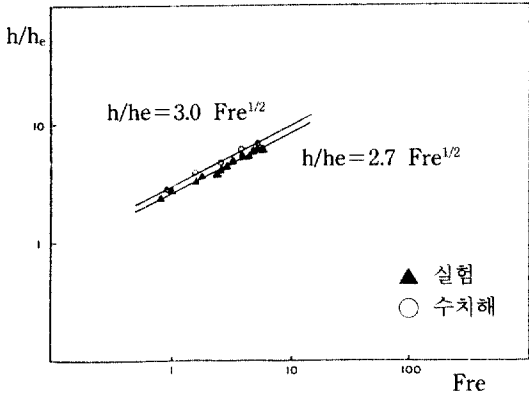


그림 9. Fre 에 따른 무차원밀도층두께 h/h_e

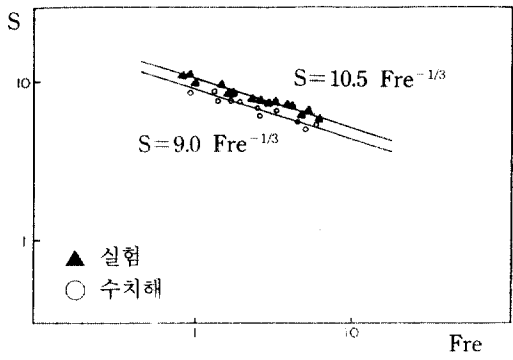


그림 10. Fre 에 따른 머리 위의 밀도층내 회석 $S, S = (\rho_0 - \rho_a)/(\rho - \rho_a)$

계를 나타낸 것으로 다음식으로 표현된다.

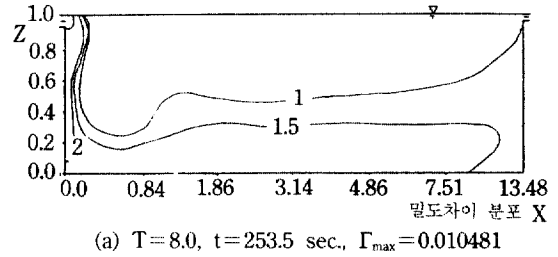
$$S = 9.0 Fre^{-1/3} \quad (10)$$

본 연구결과는 수리실험결과와 거의 일치하나 계수의 차이는 유입구 부근에서의 흐름이 수리실험은 3차원흐름이므로 유입초기에 주변수의 유입이 본 연구보다 더 많아서 밀도층두께와 회석에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

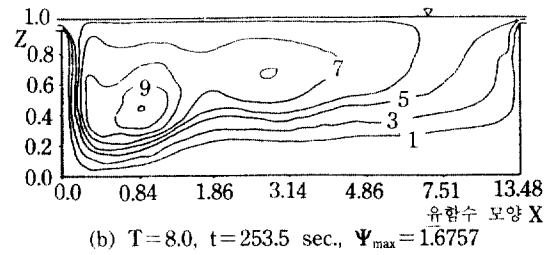
4.2 밀도류전면이 하류경계에 도달한 후

4.2.1 저수지내 흐름구조

그림 11은 $Fre=2.3$ 때 저수지내 유함수 및 밀도차이분포를 나타낸 것이다. 밀도류전면이 하류경계에 도달하기 전에는 하류경계에서 월류되는 유체는 대부분 주변수역의 유체이나 밀도류전면이 하류경계에 도달하면 연직상향유속성분에 의하여 밀도

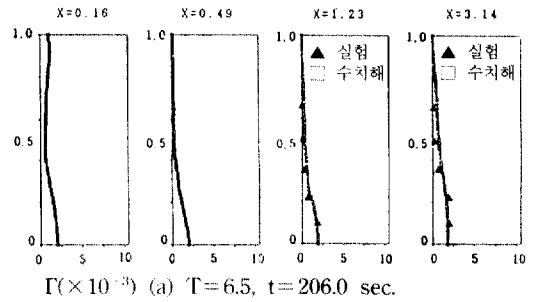


(a) $T=8.0, t=253.5 \text{ sec.}, \Gamma_{\max}=0.010481$

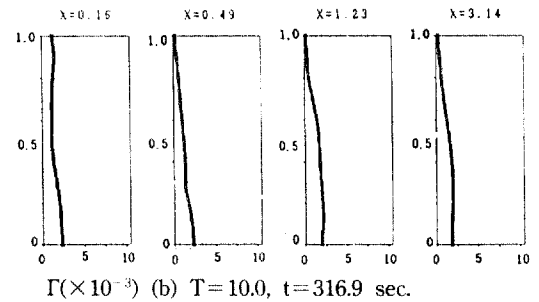


(b) $T=8.0, t=253.5 \text{ sec.}, \Psi_{\max}=1.6757$

그림 11. 밀도류전면이 하류경계에 도달한 후 저수지내 유함수 ψ 및 무차원밀도전이 분포, $\Gamma = (\rho - \rho_a)/\rho_a$ ($Fre=2.3$)



$\Gamma (\times 10^{-3})$ (a) $T=6.5, t=206.0 \text{ sec.}$



$\Gamma (\times 10^{-3})$ (b) $T=10.0, t=316.9 \text{ sec.}$

그림 12. $Fre=2.3$ 일 때 시간의 경과에 따른 저수지내 흐름방향 여러 지점에서의 무차원밀도차이 $\Gamma, \Gamma = (\rho - \rho_a)/\rho_a$

류전면이 상승하여 밀도류의 일부는 월류되면서 저수지내 밀도층의 증가가 시작된다. 이 때 하류경계에서는 밀도류전면이 하류경계에 부딪히면서 내부

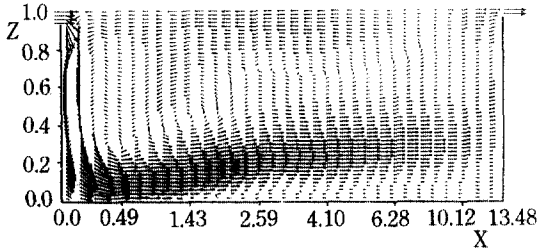


그림 13. $Fre=2.3$, $T=7.0$, $t=221.8$ sec.일 때 저수지내 속도장

도수가 형성되고 실험에서 관찰된 내부파⁽¹⁴⁾와 유사한 형태가 형성되어 상류측으로 이동하는 것으로 나타났으며 이 파의 상류측 이동이 밀도층두께의 증가를 야기시키며 저수지내 밀도분포는 연직상향으로 밀도가 작은 성층구조를 이룬다.

그림 12는 $Fre=2.3$ 때 저수지내 밀도차이분포로써 시간이 경과함에 따라 흐름방향의 모든점에서 연직농도분포가 균일하게 됨을 알수있다. 또한 $T=8.0$ (그림12에는 표시되지 않음)때 보다 $T=10.0$ (그림 12.b)에서는 $X=3.14$ 의 밀도변화는 거의 없으나 $X=0.16, 0.49, 1.23$ 지점의 밀도는 다시 연직상향으로 증가하였다. 따라서 이러한 현상은 하류에서 상류측으로 전파되는 내부파가 $X=0.49\sim 1.23$ 지점을 지나면서 밀도층이 증가한 후 이 파가 상류경계에 도달하여 반사된 후 다시 하류측으로 전파되면서 밀도층이 증가하는 것으로 해석되며 실험결과와 잘 맞는다.

4.2.3 하류경계에서 유출되는 유체의 회석

그림 14는 하류경계에서 유출되는 유체의 무차원밀도차이 Γ/Γ_e 와 무차원시간 T 와의 관계를 나타낸 것으로 여기서 Γ/Γ_e 는 $(\rho - \rho_a)/(\rho_c - \rho_a)$ 이다. 동일시간에서는 Fre 가 클수록 월류유체의 상대밀도가 증가하며 Fre 가 감소함에 따라 월류유체의 회석은 증가한다.

그림 15는 $Fre=2.3$ 때 Γ/Γ_e 와 T 의 관계로써 동일시간에서 월류유체의 밀도는 저수지 길이가 길수록 감소하고 월류유체의 밀도가 일정 값에 도달하는 시간은 저수지길이의 함수이다. 즉 주어진 유입조건 (Fre)에 대해서 회석을 증가시키기 위해서는 저수지의 길이의 증가가 필요하다.

또한 월류유체의 Γ/Γ_e 가 일정한 값(본 연구의 경우 0.1)에 이르는 시간과 무차원저수지길이 L/H 의 해

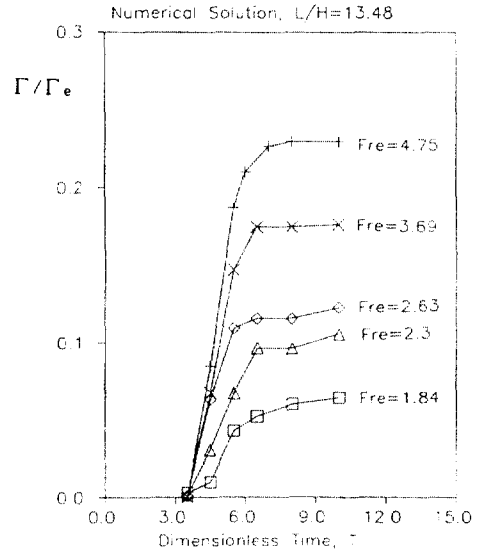


그림 14. Fre 에 따른 월류유체의 무차원밀도차이 Γ/Γ_e 와 무차원시간 T 의 관계

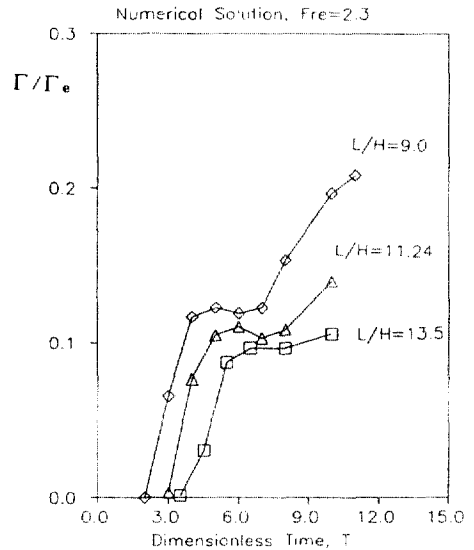


그림 15. $Fre=2.3$ 일 때 무차원저수지길이 L/H 에 따른 월류유체의 무차원밀도차이 Γ/Γ_e 와 무차원시간 T 의 관계

석에서 회석이 일정한 값에 이르는 시간은 저수지 길이가 길고 Fre 가 클수록 감소하는 것으로 나타났으며 동일 유입조건하에서는 $T \sim 1/2(L/H)$ 의 관계를 이루는 것으로 나타났다.

저수지길이가 증가할수록 T 가 증가함은 저수지

내에서 밀도류의 체류시간이 길어짐을 의미한다. 따라서 하류경계에서 월류유체가 $\Gamma/\Gamma_c=0.1$ 에 이르는 시간은 길어진다. 이러한 사실을 미루어 보아 하류경계에서 월류되는 유체의 밀도에 유입유체의 영향을 가능한 작게 하기 위해서는 저수지내의 밀도류 체류시간을 길게 하여야 하며 체류시간은 저수지길이가 길고 Fre 가 작을수록 길어진다.

5. 결 론

밀도가 큰 유체의 유입으로 인한 소규모저수지의 순환에 관한 수치해석의 결과는 실험결과와 잘 맞는 것으로 나타났으며 밀도류전면이 하류경계벽에 도달전·후에 따라 순환양상이 다르다.

밀도류전면이 하류경계에 도달하기 전에는 바닥 밀도류의 이동에 따라 침강점하류에 형성된 반시계 방향 와의 중심이 이동하며 이로 인해 저수지내 혼합이 이루어지고 연직밀도분포는 바닥의 밀도가 큰 성층구조를 이룬다. 침강점 부근의 와의 형성여부는 Fre 수의 영향을 받으며 밀도류거동 특성은 Fre 의 함수로 표현되며 기존의 실험자료와 비교적 잘 일치하였다.

밀도류전면이 하류경계에 도달하면 하류경계벽면에서는 내부도수가 형성되고 이로부터 일종의 내부파가 발생하며 저수지내 혼합은 이 파의 상,하류로 반복 진행에 따라 이루어지고 저수지내 연직밀도분포는 완만한 밀도경사를 이루면서 밀도층의 두께가 증가한다.

하류경계에서 월류되는 유체의 회석에 영향을 주는 주된 인자는 유입밀도후르드수 Fre , 무차원저수지길이 L/H , 무차원시간 T 이다. 하류경계에서 월류 유체의 밀도 또는 회석이 일정한 값에 도달하는데 소요되는 시간은 Fre 가 작을수록 증가하며 L/H 에 비례한다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 수행된 소규모 저수지에서 밀도류에 의한 순환(1989.3~1991.2)의 2차년도 연구결과로서 동 재단에 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Akiyama, J. A., Stefan, H. G., Plunging Flow into a Reservoir, *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 110, No. 4, 1984.4, pp. 484-497.
2. Altinakar, S., Graf, W. H., Hofinger, Weakly Depositing Turbidity Current on a Small Slope, *J. of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 28, No. 1, 1990, pp. 55-80.
3. Britter, R. E., Linden P. E., The Motion of the Front of a Gravity Current Travelling Down an Incline, *J. Fluid Mech.*, Vol. 88, Part 2, 1980, pp. 531-543.
4. Britter, R. E., Simpson, J. E., Experiments on the Dynamics of a Gravity Current Head, *J. fluid Mech.*, Vol. 88, part 2, 1978, pp. 223-240.
5. Darden, R. B., Imberger, J., Fisher, H. B., Jet Discharge into a Stratified Reservoir, *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 101, No. HY9, Sept., 1975, pp. 12 11-1220.
6. Kao, T. W., Park, C., Pao, H. P., Inflows, Density Currents, and Fronts, *Phys. Fluids*, Vol. 21, No. 11, Nov., 1978, pp. 1913-1922.
7. Karpik, S. R., Raithby, G. D., Laterally Averaged Hydrodynamics Model for Reservoir Predictions, *J. Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 116, No. 6, June, 1990, pp. 783-798.
8. Lammel, K., Valentine, F., Vertical FE-Model of a River Entering a Lake, *22nd Congress of IAHR*, 1987, Lausanne, Swiss. pp. 81-86.
9. Pao, H. P., Kao, T. W., Dynamics of Establishment of Selective Withdrawal of a Stratified Fluid from a Line Sink, Part I.Theory, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 65, part 4, 1974, pp. 657-688.
10. Roache, P. J., *Computational Fluid Dynamics*, Horrosa Publishers, 1976.
11. Savage, S. B., Brimberg, J., Analysis of Plunging Phenomena in Water Resources, *J. of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 13, No. 2, 1975, pp. 187-205.
12. Schamber, D. R., Larock, B. E., Numerical Analysis of Flow in Sedimentation Basin, *J. of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 107, No. HY5, May, 1981, pp. 575-591.
13. Torrance, K. E., Rockett, J. A., Numerical Study of Natural Convection in an Enclosure with Localized Heating from Below-Creeping Flow to the Onset of Laminar Instability, *J. Fluid Mech.*, Vol. 36, Part 1, 1969, pp. 33-54.

14. 윤태훈, 한운우, 소규모저수지에서 밀도류의 거동 및 순환, **대한토목학회논문집**, 제11권, 제2호, 1991. 6, pp. 27-37.
15. 한운우, 소규모저수지에서 밀도류에 의한 순환, 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1991. 8.
(接受: 1992. 10. 13)